

サブキャリア周波数変換光中継方式を用いた 光マルチドロップシステム

Optical Multi-drop System Using Optical Repeaters with Subcarrier Frequency Conversion

那須 秀行^{*}

Hideyuki Nasu

伊澤 清順^{*2}

Kiyoyuki Isawa

松永 知道^{*}

Tomomichi Matsunaga

高島 伸一^{*3}

Shin-ichi Takashima

大村 英之^{*}

Hideyuki Omura

概要 多地点を同時に映像監視するシステムは、電力事業をはじめとする様々な分野でニーズが高く、送電設備や発電設備を中心に実用化が進められている。光マルチドロップシステムはそのようなニーズに応え、光ファイバ心線を有効に使い、多地点からの複数の信号を同時伝送することが可能な映像監視システムとして開発が進められてきた。

最近では、監視箇所の増加や伝送路の長距離化への要求が高まっており、光ファイバ伝送技術への期待がますます高まると同時に、機器の設計、調整、保守等をより簡素化することで、より大規模なシステムに適應することが望まれている。

そこで、このようなニーズに応え、東北電力（株）と古河電気工業（株）の共同研究により開発したサブキャリア周波数変換光中継方式を用いた光マルチドロップシステムについて、設計、試作、実験結果を紹介する。

1. はじめに

電力事業における映像監視のニーズは高く、これまでに発電所構内や送電設備の監視システムが実用化されている。最近では、通信・配電設備箇所の監視、あるいはそれ以外の設備監視を行うニーズが高まっている。このような監視システムでは、複数の監視端局で得た映像信号を同時に長距離伝送して中央監視局に集信する機能が必要になるが、このような用途に優れた光マルチドロップ方式を利用した監視システムが、既に送電監視等において実導入されている¹⁾。光マルチドロップシステムの信号伝送系では各監視箇所から得られる映像信号を光化し、光カプラを介して1心の光ファイバに集信する。

本システムでは、30チャンネルの光信号同時伝送が可能²⁾であることが実証されており、このとき伝送距離は約20 kmであるが、最近、監視箇所の増加と遠方箇所監視の要求に従い、従来よりも多端局化及び長距離化したいという要求が高まっている。また、従来のシステムでは、中央監視局の受光器で発生する光ビート干渉（OBI: optical beat interference）³⁾を緩和するために、光源間の波長間隔を規定し、かつ各端局のサブキャリア周波数をおのおの割り当てていたが、端局数の増加に伴い、これらを簡素化することが望まれてきた。

これらの要求に応えるための一手段として、東北電力（株）と古河電気工業（株）の共同研究により、サブキャリア周波数変換光中継方式を用いた光マルチドロップシステムの開発を行

った。本報告では、このシステムの構成、所要品質の設計方法と主に新規に開発した周波数変換光中継装置の仕様について紹介し、更に伝送実験の結果について報告する。

2. サブキャリア周波数変換光中継方式を用いた 光マルチドロップシステム

2.1 システムの形態

サブキャリア周波数変換光中継方式を用いた光マルチドロップシステムの構成図を図1に示す。このシステムでは、光マルチドロップの伝送路中に周波数変換機能を有する光中継器が設置されている。各スパンにおいて、端局装置に割り当てするサブキャリア周波数の配列を等しくし、サブキャリア周波数が存在する帯域を周波数ブロックと定義する。各中継局では、各中継局の番号と同じ番号のスパン内にある端局装置から送信されるサブキャリア信号のみ周波数変換し、それ以外の周波数を持つサブキャリア信号は通過する。図2はセンタ局で見たサブキャリア周波数の配列の概念図であり、周波数ブロックごとに、アップコンバートしていき、後段の中継局ほど変換周波数が高くなる。

この方式を採用することで得られる利点は以下になる。

- 1) 中継系を用いることで、端局数を増加、伝送距離を増大することができる。
- 2) 端局のサブキャリア周波数を各スパンごとに共通化できる。
- 3) 各スパンごとに波長選別を行えば良いので、波長選別数を低減できる。

^{*} 情報電子研究所 システム機器研究室

^{*2} 東北電力株式会社 研究開発センター 電力流通

^{*3} ネットワーク事業部 光システム部 設計グループ

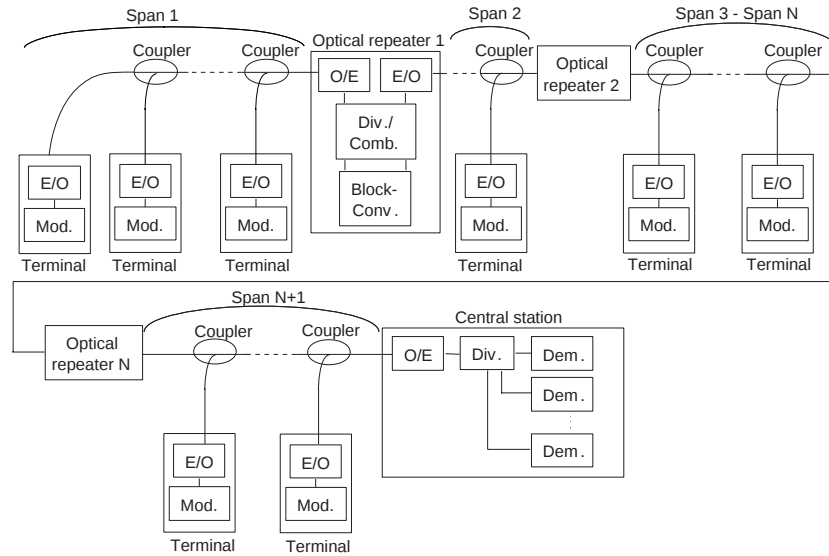


図1 サブキャリア周波数変換光中継方式を用いた光マルチドロップシステムの構成
Configuration of optical multi-drop system using optical repeaters with subcarrier frequency conversion

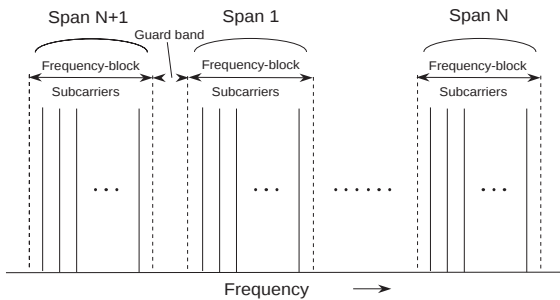


図2 中央監視局におけるサブキャリア信号の周波数配列
Subcarrier frequency allocation at central station

2.2 伝送品質の設計

2.2.1 CNR特性

OBIと中継局の電気回路系に起因する雑音発生を考慮して CNRを設計する必要がある。最初にOBIの影響について考える。OBIの影響は相対雑音強度 (RIN: relative intensity noise) を用いて表現できる。各スパンにおいて、各端局からの伝送信号と中継局からの伝送信号の CNR をそれぞれ、 CNR_t , CNR_{rep} と表すことにする。スパン内の端局数を n 、端局の i 番目端局の光変調度を $m_{t(i)}$ とし、中継局から送信される多チャンネル信号の j 番目の光変調度を $m_{rep(j)}$ とすると、

$$CNR_{t(i)} = \frac{\frac{1}{2} (m_{t(i)} MSP_{r(i)})^2}{[2e\{I_{do} + M^{2+x}(I_{dm} + SP_{total})\} + I_t^2 + (MSP_{total})^2 RIN_{total}] B} \quad \dots (1)$$

$$CNR_{rep(j)} = \frac{\frac{1}{2} (m_{rep(j)} MSP_{rep})^2}{[2e\{I_{do} + M^{2+x}(I_{dm} + SP_{total})\} + I_t^2 + (MSP_{total})^2 RIN_{total}] B} \quad \dots (2)$$

$$P_{total} = P_{rep} + \sum_i^n P_{r(i)} \quad (3)$$

となる。ここで、 P_{rep} は中継局から送信された信号の受光電力、 $P_{r(i)}$ は i 番目の端局から送信された信号の受光電力である。 M は APD の増倍率、 S は受光感度、 I_{dm} は増倍暗電流、 I_{do} は APD の暗電流、 I_t は雑音電流密度、 B は受信帯域である。 RIN_{total} は、全信号を受信したときの RIN である。

最遠端にあるスパン1において、端局から中継局1へ送信された信号は (1) 式で表され、ここで $P_{rep}=0$ である。このときの CNR を $CNR_{1,1}$ と定義する。中継局1では、周波数コンバータと E/O 前段の増幅器による雑音劣化がある。中継局を通過した後の CNR を $CNR_{1,1}'$ と表すと、スパン1の伝送系において、中継局1の E/O 入力での $CNR_{1,1}'$ は周波数コンバータの CNR を $CNR_{conv,1}$ と表し、増幅器の CNR を $CNR_{amp,1}$ として、

$$CNR_{1,1}' = \frac{1}{\frac{1}{CNR_{1,1}} + \frac{1}{CNR_{conv,1}} + \frac{1}{CNR_{amp,1}}} \quad (4)$$

となる。 $CNR_{conv,1}$ 及び $CNR_{amp,1}$ は装置の雑音指数 (NF: noise figure) を用いて求められる。スパン1に設置された端局から送信されたサブキャリア信号が中継局Nに伝送されたとき CNR を CNR_N と表すと、

$$CNR_N = \frac{1}{\sum_{k=1}^{N-1} \left(\frac{1}{CNR_{1,k}'} \right) + \frac{1}{CNR_{1,N}}} \quad (5)$$

となる。

2.2.2 複合歪特性

(1) E/O に起因する複合歪

中継局では、各スパン内のサブキャリア信号の周波数を高周

波へ繰り返し配列されるため、信号数増加に伴い、伝送帯域は広がる。レーザに起因する歪は、周波数が高いほど大きくなることが知られている。我々は既に、この影響を考慮した複合歪の品質の設計方法を提案した⁴⁾。

文献(5)によれば、信号数が n のときのCSO, CTBは、実効光変調度 m_{eff} を用いて、次のように表される。

$$\text{CSO} = \frac{Q_2 n}{m_{\text{eff}} K_2} + \frac{2\sqrt{\pi} n}{R_2 (m_{\text{eff}})^2 \left\{1 + \frac{3}{4} m_{\text{eff}}\right\} K_2} \exp\left(\frac{1}{m_{\text{eff}}^2}\right) \quad (6)$$

$$\text{CTB} = \frac{Q_3 n^2}{m_{\text{eff}} K_3} + \frac{3\sqrt{\pi} n^2}{2R_3 (m_{\text{eff}})^3 \left\{1 + \frac{3}{4} m_{\text{eff}}\right\} K_3} \exp\left(\frac{1}{m_{\text{eff}}^2}\right) \quad (7)$$

$$m_{\text{eff}} = m_{1\text{ch}} \sqrt{n} \quad (8)$$

$m_{1\text{ch}}$ は1チャンネルの光変調度である。 Q_2 と Q_3 はバイアス電流付近における非直線性を示すパラメータであり、 R_2 と R_3 は、しきい値における非直線性を示すパラメータである。 K_2 , K_3 は歪波数を示す。

(6),(7)式に周波数特性を反映させるために、光源の相互変調2次歪(IM_2), 相互変調3次歪(IM_3)の周波数特性を測定して、 IM_2 の近似係数 α_2 と IM_3 の近似係数 α_3 を求める。この近似係数の単位はdB/Hzである。

ここで、(6),(7)式における歪波数は、周波数によって異

なるゆえ、 $K_2(f)$, $K_3(f)$ と表す。 Q_2 , Q_3 , R_2 , R_3 を求めるために、 m_{eff} を与えCSOとCTBを測定した周波数をおのの f_{CSOmeas} , f_{CTBmeas} とすると、このときの歪波数 $K_2(f_{\text{CSOmeas}})$ は n の関数、 $K_3(f_{\text{CTBmeas}})$ は n^2 の関数となる。CSO, CTBは周波数特性を持つから、これらを $\text{CSO}(f)$, $\text{CTB}(f)$ と表す。(7),(8)式から得られたCSOとCTBを $\text{CSO}(f_{\text{CSOmeas}})$, $\text{CTB}(f_{\text{CTBmeas}})$ と表すと、これらは m_{eff} に依存する値となり、 n にのみ依存しなくなる。よって次の関係が成り立つ。

$$\text{CSO}(f) = \text{CSO}_{f_{\text{CSOmeas}}} K_2(f) \alpha_2 \times 10^{\frac{f_{\text{CSOmeas}} - f}{10}} \quad (9)$$

$$\text{CTB}(f) = \text{CTB}_{f_{\text{CTBmeas}}} K_3(f) \alpha_3 \times 10^{\frac{f_{\text{CTBmeas}} - f}{10}} \quad (10)$$

(2) O/Eに起因する複合歪

O/Eに起因する複合歪は歪波数だけで換算することができる。2チャンネル受信時の全受光電力 $P_{\text{total}(2w)}$ が、 n チャンネル受信時の全受光電力 $P_{\text{total}(nw)}$ と等しい場合、 n チャンネル受信時の1信号当たりの受光電力を $P_{1,nw}$ とし、2チャンネル入力時の IM_2 , IM_3 をそれぞれ $\text{IM}_{2,\text{meas}}$, $\text{IM}_{3,\text{meas}}$ と表すと、 n チャンネル受信時では、次式が成り立つ。

$$\text{CSO}_{nw} = \text{IM}_{2,\text{meas}} \left(\frac{P_{1,nw}}{P_{1,2w}} \right)^2 K_2(f) \quad (11)$$

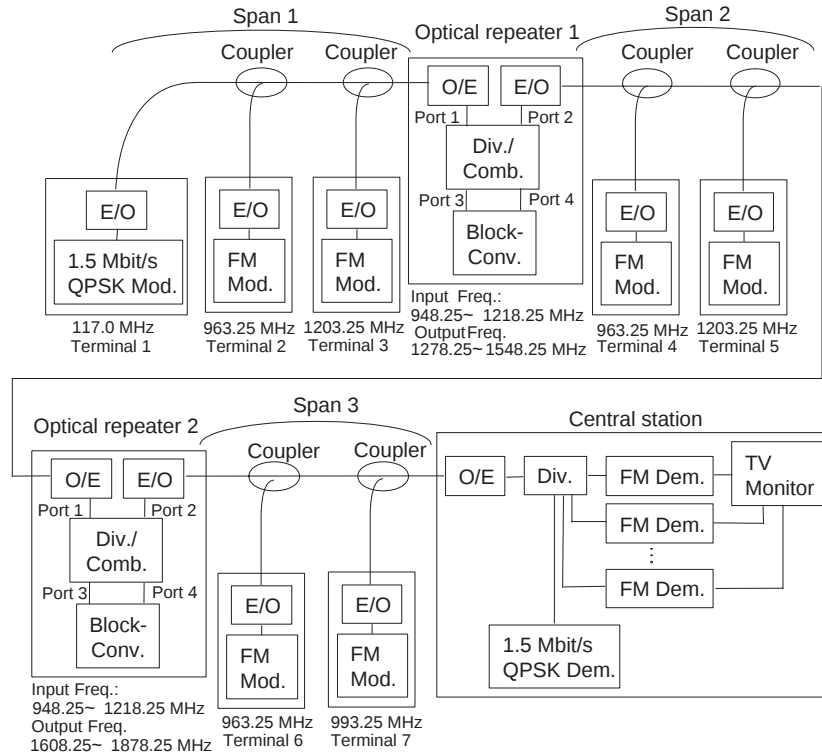


図3 開発したシステムの構成図
Configuration of engineered system

$$CTB_{nw} = IM_{3,meas} \left(\frac{P_{1,nw}}{P_{1,2w}} \right)^2 K_3(f) \quad (12)$$

3. 伝送実験

3.1 システムの構成

開発したシステムの構成を図3に示す。中継局数は2であり、スパンは3分割されている。各スパンにFM映像信号を送信する端局を2局設置し、スパン1にのみ1.5 Mbit/s QPSK信号を送信する端局を設置した。屋外用小型端局装置の外観を写真1(a)に示す。その装置内部の外観を写真1(b)に示す。写真2は、周波数変換機能を有する中継装置の外観である。中継局はO/E、分配混合器、周波数コンバー、E/Oによって構成される。写真3は中央監視装置の外観である。

3.2. 主要仕様

3.2.1 システムの主要仕様

表1にシステムの主要仕様を示す。

3.2.2 周波数変換中継局の主要仕様

ここでは中継局の主要装置である分配混合器と周波数変換器の主要仕様について、おのおの表2と表3に示す。

3.3 実験結果

3.3.1 CNR特性

各端局の送信信号は、 $m_{t(o)}=0.9$ とし、受光電力が-35 dBm/ch

一定となるように調整した。また各中継局からの送信信号はサブキャリア数にかかわらず $m_{eff}=0.3$ に調整し、中継局からの伝送信号の受光電力を、そのキャリアレベルとそのスパンの端局から送信される信号のキャリアレベルと等しくなるように調整した。更に光信号の配列を調整して、隣接する光信号に起因するOBIによる相対雑音強度が-130 dB/Hzとなるように調整した。電気系の雑音劣化を見積もるために周波数コンバータのNFを測定した結果、17 dBが得られた。また、E/OのプリアンプのNFは8 dBであった。

図4はスパン1から送信された信号の伝送系におけるCNRの測定結果とCNR値の設計結果を示す。設計結果と実測結果は良く一致していることがわかる。また所要品質を満足していることが判る。スパン2とスパン3の端局から送信される信号は、スパン1からの送信信号よりも雑音劣化原因が少なく、十分に所要CNRを満足した。

3.3.2 複合歪特性

E/Oから発生する歪を見積もるために、各中継装置に用いた光源の複合歪に関する特性パラメータを求めた。実測した結果、 $\alpha_2=8.3$ dB/GHz、 $\alpha_3=7.0$ dB/GHzとなった。また実効変調度を変えCSO、CTBを測定した結果、 $Q_2=450$ 、 $R_2=2$ 、 $Q_3=1500$ 、 $R_3=0.4$ が得られた。更に、O/Eで発生する複合歪を見積もるために、2チャンネル同時伝送時に、受光レベルに対する IM_2 と IM_3 の関係を実測し、設計データを取得した。



(a) 装置の外観



(b) 装置内部

写真1 屋外用小型端局装置の写真
Photographs of a compact terminal for outdoor use



写真2 中継装置の外観
Appearance of optical repeater

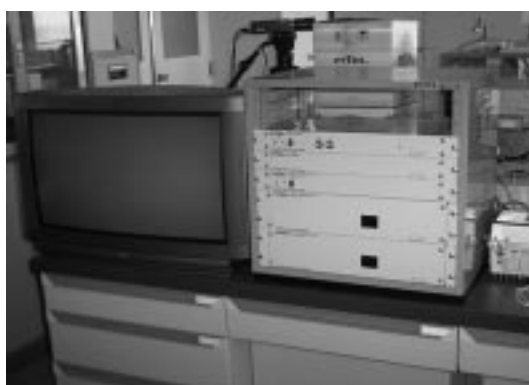


写真3 中央監視装置の外観
Appearance of central station

複合歪の設計結果及び測定結果を図5に示す。CSO, CTB共に設計結果と測定結果が一致した。また, 所要品質を満足することを確認できた。

表1 開発したシステムの主要仕様
Brief specifications of engineered system

項目		仕様
端局数		FM映像: 6, QPSK 1
中央監視局数		1
伝送容量		FM映像: 1 ch/端局, QPSK: 1 ch/端局
伝送距離		100 km以上
光ファイバ		1.3 μm 零分散シングル モードファイバ
所要品質	CNR	FM映像: 14 dB以上 QPSK: 20 dB以上
	複合歪	CSO: -28 dBc以下, CTB: -40 dBc以下
搬送波 周波数	端局	FM映像: 963.25 ~ 1203.25 MHz QPSK: 117.0 MHz
	中継局1	FM映像: 1278.25 ~ 1548.25 MHz QPSK: 117.0 MHz
	中継局2	FM映像: 1608.25 ~ 1878.25 MHz QPSK: 117.0 MHz
E/O	発光素子	DFBレーザ
	発光波長	1.3 μm 帯
	出力パワー	6 mW
O/E	発光素子	APD

3.4 伝送限界の設計

2章で述べた伝送品質の設計方法に従って, 伝送限界を求めることができる。例えば, 従来の構成による30局, 20 kmを一つの基準として, 長距離化, 多端局化の両要求を満足するように設計すると, スパンごとの端局数を15局としたとき, 中継数は2局で複合歪の品質限界となる。このとき, 総端局数は45局, 伝送距離は100 kmとなる。したがって, 従来例の指標と比較して, 局数は1.5倍, 伝送距離は5倍となる。また, 端局のサブキャリア周波数を各スパンごとに共通化でき, 各スパンごとに波長選別を行えば良いので, システム構築を簡素化することが出来る。

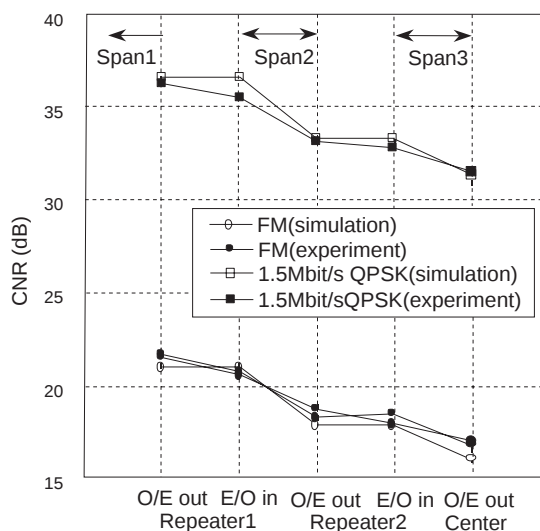


図4 CNRの特性
CNR characteristics

表2 分配混合器の仕様
Specifications of divider and combiner units

項目		仕様	
		中継局1	中継局2
周波数範囲		100 ~ 1876.75 MHz	
入出力コネクタ		SMA-J	
VSWR		1.5以下	
挿入損失		12 dB以下@Port1 ~ Port2, 8 dB以下@Port1 ~ Port3, 8 dB以下@Port4 ~ Port2	
通過帯域内偏差		$\pm 1.8\text{dB}$ 以下@(Port1 ~ Port2, Port1 ~ Port3, Port4 ~ Port2)	
許容入力		0.5 W以下	
使用温度範囲		-10 ~ +40	
外形寸法		480(W) $\times$ 99(H) $\times$ 400 (JIS2ピッチ), 単位: mm	
BEF	阻止帯域	949.75 MHz ~ 1216.75 MHz	
	通過帯域	100 MHz ~ 140 MHz, 1279.75 MHz ~ 1876.75 MHz	
	減衰量	45 dB以上	
BPF	阻止帯域	1279.75 MHz ~ 1546.75 MHz	1609.75 MHz ~ 1876.75 MHz
	通過帯域	100 MHz ~ 140 MHz, 1609.75 MHz ~ 1876.75 MHz	100 MHz ~ 1546.75 MHz,
	減衰量	40 dB以上	

表3 周波数変換器の仕様
Specifications of frequency converter units

項目	仕様	
	中継局1	中継局2
入力周波数	948.25 ~ 1218.25 MHz	
出力周波数	1278.25 ~ 1548.25 MHz	1608.25 ~ 1878.25 MHz
第1局部発振周波数	1555 MHz	
第2局部発振周波数	1885 MHz	2215 MHz
周波数安定度	100 Hzp-p	
標準利得	10 dB	
利得平坦度	4 dBp-p以内(270 MHz帯域), 1 dBp-p以内(任意の27 MHz帯域)	
標準出力レベル	85 dBm	
利得調整範囲	0 ~ -10以上	
帯域内スプリアス	-40 dBc以下(標準出力時)	
帯域外減衰量	30 dB以上	
入出力インピーダンス	50 Ω W, (コネクタ: SMA-J)	
入出力VSWR	2.5以下	
雑音指数	20 dB以下	
位相雑音	-52 dBc/Hz以下	
相互変調歪	-40 dBc以下	
電源	AC100 V	
消費電力	7 W以下	
使用温度範囲	-15 ~ 45	
外形寸法	480(W) × 99(H) × 373.6 (JIS2ピッチ), 単位: mm	
質量	7 kg	

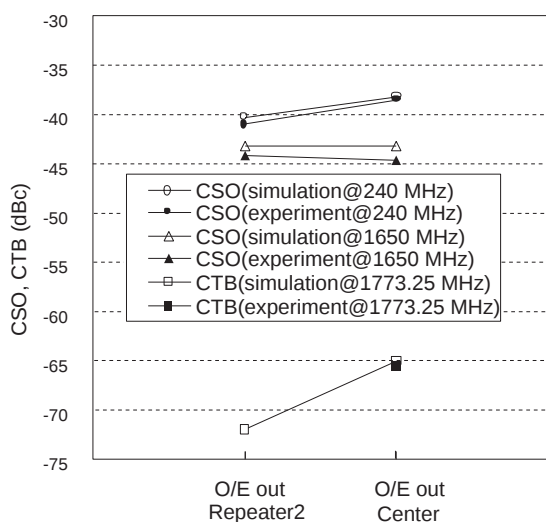


図5 複合歪特性
Composite distortion characteristics

4. おわりに

長距離化及び多端局化，光源の波長選別の緩和とサブキャリア周波数の割当て数の簡素化を目的として，サブキャリア周波数変換光中継方式を用いた光マルチドロップシステムを提案し，開発した。

目標装置仕様を明らかにし，各種ユニットを作製して伝送システムを構築した。そのシステムを用いた実験を通して，伝送品質の設計方法を考案し，実測結果と比較して設計方法が妥当であることが確認できた。また所要品質を満足して信号を伝送できた。

本システムを用いることにより，長距離化及び多端局化が実現され，かつ各スパンごとに波長管理と周波数割当てを行えば良いのでシステム構築を簡素化することが出来る。

参考文献

- (1) 篠田雪久，後藤真宏，大村英之，松尾望: "双方向光パッシブネットワークの検討 (その4)", 信学技報, OCS93-62, (1993), 7.
- (2) N. Matsuo, H. Omura, H. Nakayama and T. Kawaguchi: "The experimental study of the influence of optical beat interference on FM-video transmission system employing 30ch multiple optical carriers", ECOC'94, We.P.21, (1994), 857.
- (3) C. Desem: "Optical interference in subcarrier multiplexed system with multiple optical carriers", IEEE J. Sele. Areas Commun., 7, (1990), 1290.
- (4) 松永知道，高島伸一，大村英之，伊澤清順，伊藤眞: "広帯域SCMシステムの上り帯域における雑音および複合歪特性についての検証", 信学技報, OCS97-78, (1997), 13.
- (5) 前田幹夫: "FM-FDM光CATV伝送におけるひずみおよびCN比特性の検討", 信学論B-I, 1, (1993), 60.